압전세라믹의 재료 물성 및 특성 평가기술

글 _ 임종인[1], 김병익[2] | 요업(세라믹)기술원 [1]시뮬레이션센터, [2]세라믹건자재본부
jongin@kicet.re.kr

1. 서 론

재료에 응력(T)를 인가하면 분극(P)가 발생하고, $P=dT$ (d : 압전상수)로 표시된다. 이를 정 압전효과 (Positive Piezoelctric Effect)라고 한다. 또한 재료의 두 전극사이에 전기장(E)를 가하면 재료에 변형(S)가 발생하고, 이를 역 압전효과라 하며 $S=dE$로 나타내어 진다. 이와 같은 현상을 발생하는 물질을 압전재료라 한다.[1)]

압전재료로는 $BaTiO_3$, $Pb(Zr,Ti)O_3$(PZT), PZT-Pb(Mg⅓,Nb⅔)O_3 등 복합 페로브스카이트계 세라믹 등 다양한 재료가 있고, 최근 PZT계 세라믹 단결정 개발 및 이를 이용한 응용부품에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 PZT계 세라믹은 가공성이나 제반 압전특성이 우수하고 가격이 저렴하여 초음파 진동자, 필터, 레조네이터, 착화소자 및 센서 등에 가장 널리 응용되고 있다. 그리고 PZT-고분자의 복합재료는 압전특성은 다소 낮지만 음향특성 및 가공성이 우수하여 각종 키보드나 수중음향부품, 의료용 탐촉자 등에 주로 응용되고 있다. 또한 $LiNbO_3$와 $LiTaO_3$ 세라믹 단결정 재료는 탄성표면파 (SAW : Surface Acoustic Wave) 필터로 응용되고 있고, 압전특성이 아주 우수한 PZT 및 PMN-PZT 세라믹 단결정은 1990년대 후반에 미래기술을 선도할 20대 핵심기술로 선정되어 많은 연구자들이 이 분야에 연구를 집중하고 있다.[1-5)]

압전 응용부품은 재료물성의 이방성을 이용하여 다양한 형태로 제작하여 이용되고 있으므로 압전재료의 물성을 정확하게 측정하는 것이 필요하다. 압전재료의 물리적 특성은 주로 공진-방공진법을 이용하여 평가하고 있고, 이에 대한 측정규격은 IEEE 및 일본 전자재료공업회 측정규격(EMAS)에 잘 언급되어 있다.[1,6-8)]

본 논문에서는 IEEE 및 EMAS 측정규격을 참조하여 압전재료에 대한 재료물성를 나타내는 구성방정식 및 압전 진동자의 진동모드, 압전소자의 측정규격, 압전재료의 재료물성 평가 사례들을 중심으로 정리하여 소개하고자 한다.

2. 압전세라믹스의 재료물성

압전 물질이란 그에 가해지는 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로간에 변환시킬 수 있는 특성을 가진 재료를 말하며, 압전 효과는 재료에 가해지는 응력(T), 전계(E), 변형(S), 그리고 전기적 변위(D)로 표현된다. 이들 변수들을 이용하여 압전세라믹의 압전현상 나타내는 구조방정식으로 d형식, e형식, g형식, h형식이 있고, 이들 구조방정식은 각각 다음의 식과 같이 나타내어 진다.[4-6,8)]

$$\begin{aligned} S &= {}_{s}^{E}T + dE \\ D &= dT + \varepsilon^{T}E \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T &= c^{E}S - eE \\ D &= eS + \varepsilon^{S}E \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} S &= {}_{s}^{D}T + gD \\ E &= -gT + \beta^{T}D \end{aligned} \quad (3)$$

$$T = c^D S - hD$$
$$E = -hS - \beta^S D \quad (4)$$

여기서 s는 탄성 유연 계수 (elastic compliance), c는 탄성 강성 계수 (elastic stiffness), ε은 유전율 (permittivity), β는 역유전율 (impermeability)이다. 윗첨자로 쓰여진 E, T, S, D는 각각 전계, 응력, 변형, 전기적 변위가 일정할 때의 값을 의미하는데, 예를 들어 s^E는 전계가 일정할 때의 탄성 유연 계수를 나타낸다. 또한 기계장과 전기장을 연결하는 압전 계수 d, g, e, h는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\left(\frac{\partial D}{\partial T}\right)_E = \left(\frac{\partial S}{\partial E}\right)_T = d\ ,\quad -\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_D = \left(\frac{\partial S}{\partial D}\right)_T = g\ ,$$
$$\left(\frac{\partial D}{\partial S}\right)_E = -\left(\frac{\partial T}{\partial E}\right)_S = e\ ,\quad \left(\frac{\partial E}{\partial S}\right)_D = \left(\frac{\partial T}{\partial D}\right)_S = -h \quad (5)$$

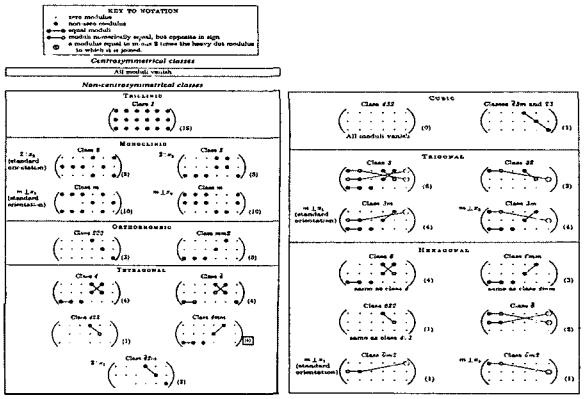
압전재료의 물성을 나타내는 전 성분을 식(1)의 d형식을 사용하여 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & s_{14}^E & s_{15}^E & s_{16}^E & d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & s_{24}^E & s_{25}^E & s_{26}^E & d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & s_{34}^E & s_{35}^E & s_{36}^E & d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ s_{41}^E & s_{42}^E & s_{43}^E & s_{44}^E & s_{45}^E & s_{46}^E & d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ s_{51}^E & s_{52}^E & s_{53}^E & s_{54}^E & s_{55}^E & s_{56}^E & d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ s_{61}^E & s_{62}^E & s_{63}^E & s_{64}^E & s_{65}^E & s_{66}^E & d_{16} & d_{26} & d_{36} \\ d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & \varepsilon_{11}^T & \varepsilon_{12}^T & \varepsilon_{13}^T \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} & \varepsilon_{21}^T & \varepsilon_{22}^T & \varepsilon_{23}^T \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} & \varepsilon_{31}^T & \varepsilon_{32}^T & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

압전 특성은 재료내의 전기적인 쌍극자 (electric dipole)들이 외부로부터의 전계나 응력에 의해 내부에 쌍극자 모멘텀 (dipole momentum)을 발생 시킴으로써 나타나게 된다. 따라서 압전 현상은 결정학적으로 이방성이며 비 중앙대칭(non-centrosymmetric)인 재료에서만 나타나게 되고, Table 1에 나타낸 바와 같이 결정학적인 총 32개의 점그룹(point group)중에서 비 중앙대칭인 20개에서만 나타나게 된다. Table 1은 압전 현상을 나타내는 20개의 점그룹 각각에 대한 압전 계수 행열 형태를 나타내는데, 대칭성이 가장 적은 Triclinic계에서는 행열 내의 모든 상수들이 18개의 독립 상수를 가지다가, 대칭성이 증가함에 따라 점차 독립 상수의 개수가 줄어든다.[4)]

즉, 압전물질의 결정에 대한 대칭성을 고려할 경우, 서

Table 1. 결정대칭성에 따른 압전상수 분포[4)]



로 동일한 값의 재료정수 및 영이 되는 재료정수가 존재하게 되어 독립적인 재료정수는 감소하게 된다. 압전세라믹의 분극 축을 z(3)축으로 하고, 그와 수직인 임의의 두축을 각각 x(1) 및 y(2)축으로 설정하여 6mm 결정그룹에 해당하는 압전세라믹의 재료정수는 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11}^E - s_{12}^E) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기에서 알 수 있듯이, 압전재료의 물성을 나타내는 독립 재료정수는 S_{11}^E, S_{12}^E, S_{13}^E, S_{33}^E, S_{44}^E, d_{31}, d_{33}, d_{15}, ε_{11}^T, ε_{33}^T 등 10개로 감소함을 알 수 있다.

압전세라믹의 물질특성을 나타내는 다른 중요한 재료정수로는 포와송비(σ^E), 전기기계결합계수(k), 유전손실율 ($\tan\delta_m$), 기계적품질계수(Qm) 등이 있다.

압전물질의 탄성변형영역에서 한 방향으로 응력을 가할 경우, 응력과 수직인 방향의 변위와 응력 인가방향의 변위의 비를 포와송비로 나타낸다. 또한 재료의 총체적 압전 효과의 크기는 전기기계 결합계수 (k^2) 를 사용하여 나타내는데, k^2는 재료에 가해준 전기적 에너지에 대한 기계적 에너지로 변환된 에너지 양의 분율 또는 그 역으로

정의된다. 이러한 성질을 이용한다면 우수한 전기 기계 결합계수를 가진 압전 소자는 적절한 외부 전기 신호를 인가함으로써 원하는 주파수대에서 원하는 형태의 진동을 발생시키는 진동자로 구현할 수 있다.

3. 압전재료의 진동모드

3.1 압전재료의 길이방향 진동모드

압전체의 길이방향 진동은 압전체가 두께 방향으로 분극된 상태에서, 역시 두께 방향으로 외부에서 전기 신호가 입력되면, 그에 따라 압전체가 길이 방향으로만 진동하는 형태이다. 실제 상황에서 이렇게 외부 전기신호에 더해 길이 방향만의 진동이 우세하게 관찰되려면 압전체의 길이방향 규격이 폭이나 두께에 비해 10배 이상 길어야만 한다. 그렇지 않다면 폭 방향과 두께 방향의 진동도 한 상당한 크기로 인접 주파수 대역에서 발생하게 되어 순수한 길이방향 모드 진동의 관찰이 어렵게 된다.

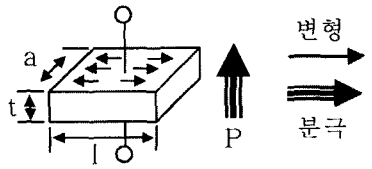


Fig. 1. 압전재료의 길이방향 진동모드

일반적인 압전 구조방정식에서 길이방향 진동모드에 관여하는 성분만 표시하면 아래와 같다.

$$S_1 = S_{11}^E T_1 + d_{31} E_3$$
$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (8)$$

압전체의 길이(l)는 12이상이고, 길이/폭(a) 이 4이상, 폭(a)/두께(t)가 3이상인 경우, 압전체의 순수한 길이방향 진동모드를 측정할 수 있다. EMAS-6004에서는 l*a*t를 12*3*1 mm로 추천하고 있다.[8]

압전체의 길이방향 진동모드를 보이는 형상에서 공진주파수(f_r) 및 반공진주파수(f_a), 정전용량(C_f)를 측정하고, 압전재료의 S_{11}^E및 k31, ε_{33}^T등을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$s_{11}^E = \frac{1}{\rho} \bullet \left(\frac{1}{2 \bullet l \bullet f_r} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{k_{31}^2}{1-k_{31}^2} = -\frac{\pi}{2} \bullet \frac{f_a}{f_r} \cot\left(\frac{\pi}{2} \bullet \frac{f_a}{f_r} \right) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{33}^T = \frac{C_f \bullet t}{l \bullet a} \quad (11)$$

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{\varepsilon_{33}^T \bullet s_{11}^E} \quad (12)$$

3.2 압전재료의 반경방향 진동모드

압전체의 반경방향 진동은 압전체가 두께 방향으로 분극된 상태에서, 역시 두께 방향으로 외부에서 전기 신호가 입력되면, 그에 따라 압전체가 경방향으로만 진동하는 형태이다. 실제 상황에서 이렇게 외부 전기신호에 대해 경방향 만의 진동이 우세하게 관찰되려면 압전체의 직경이 두께에 비해 10배 이상 길어야만 한다. 그렇지 않다면 두께방향의 진동 또한 상당한 크기로 발생하게 되어 순수한 경방향 모드 진동의 관찰이 어렵게 된다.

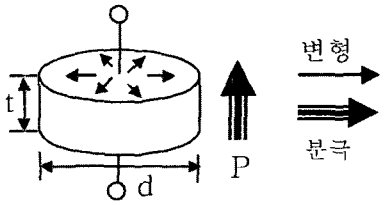


Fig. 2. 압전소자의 반경방향 진동모드

압전재료의 경방향 진동모드의 경우, 수식으로 표현하기 난해하여 일반적으로 포와송비(σ^E) 및 ε_{33}^T, S_{12}^E, k_r 등을 구하는데 이용된다. EMAS-6001 규격은 압전체의 직경(d) 및 두께(t) 비를 각각 15~20, 1mm로 추천하고 있고, EMAS-6004규격에는 각각 15, 0.5mm를 권장하고 있다.[8]

압전소자의 포와송비(σ^E)는 원판형 소자의 기본공진인 1차 공진주파수(f_r^1) 및 상위의 2차 공진주파수(f_r^2)를 측정하여 (f_r^2)/ (f_r^1)를 계산하고, 근사화된 Table 2에서 그 값을 찾는 방법을 간편하게 이용한다.

또한 및 k_r은 다음 수식으로부터 구한다.

Table 2. 포와송비와 2차/1차 공진주파수의 관계[7,8]

포와송비	$f_r^{(2)}/f_r^{(1)}$	포와송비	$f_r^{(2)}/f_r^{(1)}$	포와송비	$f_r^{(2)}/f_r^{(1)}$
0.11	2.7842	0.26	2.6595	0.41	2.5581
0.12	2.7750	0.27	2.6521	0.42	2.5520
0.13	2.7660	0.28	2.6447	0.43	2.5460
0.14	2.7570	0.29	2.6375	0.44	2.5400
0.15	2.7482	0.30	2.6304	0.45	2.5342
0.16	2.7396	0.31	2.6234	0.46	2.5284
0.17	2.7310	0.32	2.6165	0.47	2.5226
0.18	2.7226	0.33	2.4096	0.48	2.5170
0.19	2.7143	0.34	2.6029	0.49	2.5114
0.20	2.7061	0.35	2.5962	0.50	2.5059
0.21	2.6981	0.36	2.5897		
0.22	2.6901	0.37	2.5832		
0.23	2.6823	0.38	2.5768		
0.24	2.6746	0.39	2.5705		
0.25	2.6670	0.40	2.5642		

$$s_2^E = -\sigma^E \bullet s_{11}^E \tag{13}$$

$$k_r = \frac{\sqrt{2}\cdot d_{31}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T\left(s_{11}^E + s_{12}^E\right)}} \cdots or \cdots \frac{1}{k_r^2} \approx 0.395 \bullet \frac{f_r}{f_a - f_r} + 0.574 \tag{14}$$

3.3 압전재료의 종방향 진동모드

압전체의 종방향 진동은 압전체가 길이 방향으로 분극된 상태에서, 역시 길이 방향으로 외부에서 전기 신호가 입력되면, 그에 따라 압전체가 원기둥의 길이 방향으로만 진동하는 형태이다. 원기둥형 압전소자의 길이(l)가 직경(d)보다 2.5배 이상일 경우, 외부 전기신호에 대해 길이 방향의 진동이 반경방향 진동보다 우세하게 관찰된다(EMAS-6002 규격).[8]

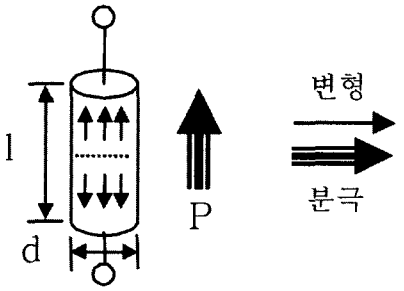


Fig. 3. 압전소자의 종방향 진동모드

일반적인 압전 구조방정식에서 종방향 진동모드(longitudinal vibration mode)에 관여하는 성분만 표시하면 아래와 같다.

$$S_3 = s_{33}^D T_3 + g_{33} D_3$$
$$E_3 = -g_{33} T_3 + \beta^T{}_{33} D_3 \tag{15}$$

만약 길이가 15mm 이고, 직경이 6mm인 원기둥형 압전소자의 공진주파수(f_r) 및 반공진주파수(f_a)를 측정할 경우, 다음 관계식으로부터 압전재료의 S_{33}^D, k_{33}, S_{33}^E, d_{33}, g_{33}등을 계산할 수 있다.

$$s_{33}^D = \frac{1}{\rho}\cdot\left(\frac{1}{2l\cdot f_a}\right)^2 \tag{16}$$

$$\kappa_{33}^2 = \frac{\pi}{2}\cdot\frac{f_r}{f_a}\cot\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{f_r}{f_a}\right) \tag{17}$$

$$s_{33}^E = \frac{s_{33}^D}{1-\kappa_{33}^2} \tag{18}$$

$$d_{33} = \kappa_{33}\sqrt{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E} = g_{33}\cdot\varepsilon_{33}^T \tag{19}$$

3.4 압전재료의 두께방향 진동모드

압전체의 두께 진동은 압전체가 두께 방향으로 분극된 상태에서, 역시 두께 방향으로 외부에서 전기 신호가 입력되면, 그에 따라 압전체가 두께 방향으로만 진동하는 형태이다. 실제 상황에서 이렇게 외부 전기신호에 대해 두께 방향만의 진동이 우세하게 관찰되려면 압전체의 횡방향 규격이 두께에 비해 10배 이상 길어야만 한다. 그렇지 않다면 횡방향의 진동 또한 상당한 크기로 발생하게 되어 순수한 두께 모드 진동의 관찰이 어렵게 된다.

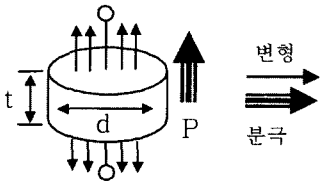


Fig. 4. 압전재료의 두께방향 진동모드

일반적인 압전 구조방정식에서 두께 진동모드에 관여하는 성분만 표시하면 아래와 같다.

$$T_3 = c_{33}^D S_3 - h_{33} D_3$$
$$E_3 = -h_{33} S_3 + \beta_{33}^S D_3 \tag{20}$$

압전소자의 두께가 1mm이고, 직경이 10mm인 원판형 소자에 대한 공진주파수(f_r) 및 반공진주파수(f_a)를 측정할 경우, 다음 관계식으로부터 압전재료의 c_{33}^D, k_t, $c^E{}_{33}$, S_{13}^E

등을 구할 수 있다.

$$c_{33}^{D} = 4 \cdot t^2 \cdot \rho \cdot f_a^2 \tag{21}$$

$$\kappa_t^{\,2} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right) \tag{22}$$

$$c_{33}^{E} = c_{33}^{D}\left(1 - \kappa_t^{\,2}\right) \tag{23}$$

$$s_{13}^{E} = \sqrt{\frac{\left(c_{33}^{E}\, s_{33}^{E} - 1\right)\left(s_{11}^{E} + s_{12}^{E}\right)}{2c_{33}^{E}}} \tag{24}$$

3.5 압전재료의 두께 미끄럼 진동모드

압전체의 두께 미끄럼 진동은 압전체가 길이 방향으로 분극된 상태에서, 역시 두께 방향으로 외부에서 전기 신호가 입력되면, 그에 따라 압전체의 두께방향 상면 및 하면이 각각 반대방향으로 진동하는 형태이다.

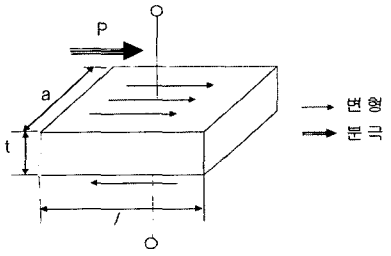


Fig. 5. 압전소자의 두께 미끄럼 진동모드

일반적인 압전 구조방정식에서 두께 미끄럼(thickness shear) 진동모드에 관여하는 성분만 표시하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} T_5 &= c_{44}^{D} S_5 - h_{15} D_1 \\ E_1 &= -h_{15} S_5 + \beta_{11}^{S} D_1 \end{aligned} \tag{25}$$

압전소자의 길이가 두께 및 폭 보다 훨씬 크게되면, 미끄럼진동이 우세하게 나타난다. 압전소자의 길이 및 폭, 두께가 각각 10, 2.5, 0.25mm 인 직사각형 압전소자(EMAS-6005 규격)[8]에 대하여 공진주파수(f_r) 및 반공진주파수(f_a), 정전용량(C_f)를 측정할 경우, 다음 관계식으로부터 압전재료의 c_{44}^{D}, k_{15}, c_{44}^{E}, ε_{11}^{T}, d_{15}, s_{66}^{E}, 등을 구할 수 있다.

$$c_{44}^{D} = 4t^2 \cdot \rho \cdot f_a^{\,2} \tag{26}$$

$$\kappa_{15}^{\,2} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right) \tag{27}$$

$$c_{44}^{E} = c_{44}^{D}\left(1 - \kappa_{15}^{\,2}\right) \tag{28}$$

$$s_{44}^{E} = \frac{1}{c_{44}^{E}} \tag{29}$$

$$\varepsilon_{11}^{T} = \frac{C_f \cdot t}{l \cdot a} \tag{30}$$

$$d_{15} = \kappa_{15} \sqrt{\varepsilon_{11}^{T}\, s_{44}^{E}} \tag{31}$$

$$s_{66}^{E} = 2\left(s_{11}^{E} - s_{12}^{E}\right) \tag{32}$$

앞에서 언급한 압전재료의 진동모드 및 압전소자의 형상 및 규격, 이로부터 구해지는 재료물성 등을 요약하여 Table 3에 나타내었다.

여기에 언급되지 않은 압전재료의 특성은 압전 구조방정식으로부터 계산할 수 있다.

3.6 압전세라믹의 재료물성 측정 사례

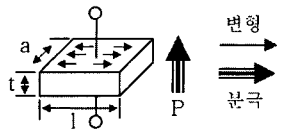
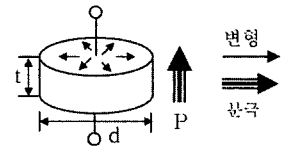
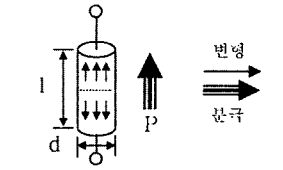
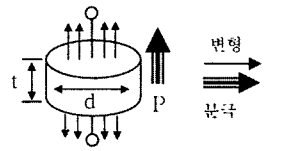
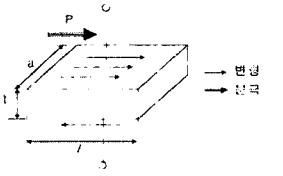
압전재료의 다양한 진동자 형상에 대한 물성을 측정하고(Table 4 참조), 식(9)부터 식(32)를 이용하여 압전재료에 대한 물리적 특성을 계산하였다.

상기한 압전재료의 물리적 특성으로부터 *압전재료의* 탄성 유연계수 (s), 탄성 강성계수 (c), 압전상수(e), 유전율 (ε)등을 구하고, 이를 행렬형태로 나타내면 아래와 같다. 특히 압전재료의 g상수 및 h상수는 각각 $[g]=[\beta^T][d]$, $[h]=[\beta^S]\,[e]$의 관계식으로부터 계산한 값이다.

4. 요 약

압전재료의 다양한 에너지 변환특성 중 기계-전기 에너지간 변환 특성만을 이용하고자 하는 경우로 한정하고, 압전재료의 물성 및 진동모드, 재료물성 평가 사례들을 요약하여 소개하였다. 그러나 이상에서 설명한 압전특성

Table 3. 압전소자의 진동모드 및 형상, 재료물성[8)]

진동 모드	압전재료의 진동자 형상		압전재료 물성		
	형 상	크 기	탄성상수	압전상수	기 타
길이 진동		$l/a \geq 4 \begin{cases} l=12 \\ a=3 \\ t=1 \end{cases}$ $a/t \geq 3$ $l \geq 12$	$s_{11}^E, s_{12}^E, s_{66}^E$	d_{31}	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ ρ, σ^E
반경 진동		$d/t \geq 15 \begin{cases} t=1 \\ d=15\sim 20 \end{cases}$ $d/t \approx 30 \begin{cases} t=0.5 \\ d=15 \end{cases}$	s_{33}^D, s_{33}^E	d_{33}, g_{33}	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ ρ
종 진동		$l/d > 2.5$ $l \approx 15$ $d \approx 6$	c_{33}^D, c_{33}^E		$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ ρ
두께 진동		$d/t \geq 10 \begin{cases} t=1 \\ d=10 \end{cases}$	s_{11}^E	d_{31}, g_{31}	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ ρ
두께 미끄럼 진동		$l > a > t \begin{cases} t=0.25 \\ a=2.5 \\ l=10 \end{cases}$ $l > t > 32$	$c_{44}^D, c_{44}^E, s_{44}^E$	d_{15}, g_{15}	$\varepsilon_{11}^T/\varepsilon_0$ σ^E

은 매우 개략적인 개념으로서 우수한 압전 응용부품을 개발하기 위해서는 몇 가지 유의할 사항들이 있다. 압전재료는 보다 기본적으로 열에너지, 기계에너지, 전기에너지, 나아가서 Maxwell 방정식에 의해서 전기장과 연결되는 자기에너지 까지도 연결시켜서 상호간에 에너지 변환작용을 일으킬 수 있는 특성을 가진다.

기계적 변형(S) = 탄성변형효과 + 역압전효과 + 열팽창 효과

전기적 변위(D) = 압전효과 + 유전효과 + 초전효과

즉, 압전 응용부품이 온도변화 및 자기장이 인가되는 환경에서 순수하게 압전현상만을 이용하고자 한다면, 응용분야 및 주위환경에 따라 압전세라믹 소자가 외부 환경변화에 반응을 하지 않도록 적절한 차단 대책을 수립하여야만 한다. 그러나 압전재료의 외부 자기장의 변화에 대한 반응도는 전기장에 대한 반응도에 비해서 매우 작으므로 통상 무시해도 무방하다고 본다. 그리고 압전재료에서 전기장-기계장의 선형성이 보장되는 크기에는 뚜렷한 한계가 있고, 선형성 영역을 벗어나면 이력특성에 의해 비선형 특성 및 포화상태를 보이게 된다는 점 또한 주의하여야 할 점이다. 또한 압전특성은 Curie 온도 이하에서만 존재하고, 그 이상의 온도 에서는 쌍극자들

의 지나친 운동성에 의해 결정 대칭성이 변하여 압전특성이 소멸되므로 사용 온도 구간에 엄격한 제한을 두어야 함도 응용에 유의하여야 한다.

Table 4. 압전재료의 물성측정을 위한 측정 값

진동모드	항 목	측정값	진동모드	항 목	측정값
사각형판 길이진동	fr (KHz)	119.8	원기둥의 종진동	f_r (KHz)	89.0
	fa(kHz)	126.2		f_a(kHz)	124.4
	Zr(Ohm)	327		L(mm)	15.1
	Cf(pF)	483	원판의 두께진동	f_r (KHz)	1951.8
	L*a*t(mm)	12*3*1		f_a(kHz)	2155.4
원판형 반-경진동	f_r^1 (KHz)	131.7		t(mm)	1.1
	f_r^2 (KHz)	344	사각형판의 두께 미끄럼 진동	f_r (KHz)	3378.7
	f_a(kHz)	161.4		f_a(kHz)	4619.3
	Z_r(Ohm)	17.9		C_f(pF)	1727
	C_f(pF)	2510		L*a*t(mm)	10*2.5*0.25
	D*t(mm)	15*1	밀도	(kg/m^3)	7815

$$[c^E]=\begin{bmatrix}14.20 & 9.34 & 9.36 & 0.0 & 0.0 & 0.0\\ 9.34 & 14.20 & 9.36 & 0.0 & 0.0 & 0.0\\ 9.36 & 9.36 & 12.50 & 0.0 & 0.0 & 0.0\\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 2.14 & 0.0 & 0.0\\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 2.14 & 0.0\\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 2.43\end{bmatrix}\times 10^{10}$$

$$[d]=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 654 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 654 & 0 & 0\\ -168 & -168 & 396 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\times 10^{-12}$$

$$[g]=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 37.0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 37.0 & 0 & 0\\ -11.3 & -11.3 & 26.7 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\times 10^{-3}$$

$$[e]=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 13.90 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 13.90 & 0 & 0\\ -2.55 & -2.55 & 18.10 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$[h]=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 1.63 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1.63 & 0 & 0\\ -0.36 & -0.36 & 2.28 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\times 10^{9}$$

$$[\varepsilon^S]/\varepsilon_0=\begin{bmatrix}973 & 0 & 0\\ 0 & 973 & 0\\ 0 & 0 & 765\end{bmatrix}\quad \&\quad [\varepsilon^T]/\varepsilon_0=\begin{bmatrix}1980 & 0 & 0\\ 0 & 1980 & 0\\ 0 & 0 & 1670\end{bmatrix}$$

참고문헌

1. B. Jaffe, et al., Piezoelectric ceramics, Academic Press (London and New York) (1971).
2. S.E.E. Park and W. Hackenberger, High performance single crystal piezoelectrics: applications and issues, Solid State and Material Science, 6, 11-18 (2002).
3. C. Niezrecki, et al., Piezoelectric actuation, The Shock and vibration digest, 269-280 (2001).
4. J.F. Nye, Physical properties of crystals, Clarendon Press(Oxford) (1985).
5. O.B. Wilson, Introduction to theory and design of sonar transducers, Peninsula Press (Los Altos) (1988).
6. IEEE standard on piezoelectricity, IEEE Trans. On Sonics and Ultrasonics, SU-31[2] (1984).
7. H. Meitzler, H. M. O'bryan and H. F. Tiersten, "Definition and Measurement of Radial Mode Coupling Factors in Piezoelectric Ceramic Materials with Large Variations in Poisson's Ratio", IEEE Trans. on Sonic. and Ultrason., su-20[3] 233 (1973).
8. 압전세라믹 진동자의 시험방법, Japan Electronic Manufacturers Association Standard(EMAS).

●● 임 종 인

- 1986년 한양대학교 (학사)
- 1989년 KAIST (석사)
- 1999년 경북대학교 (박사)
- 2002년-현재 요업(세라믹)기술원 시뮬레이션센터 (센터장)
- 2002년-2003년 한양대학교 산업대학원 (겸임교수)
- 1991년 (미) Penn. State Univ. MRL (Visiting Researcher)
- 1989년-2002 포항산업과학연구원(RIST) 재료공정연구센터 (책임연구원)

●● 김 병 익

- 한양대학교 요업공학과 (학사)
- 한양대학교 무기재료공학과 (석사, 박사)
- 현재 요업기술원 세라믹 · 건재본부 본부장